Evaluation de l'effet handicap de la PMD sur les transmissions optiques à longues distances et à haut débit

CHENIKA Abdelfettah *, *TEMMAR Abdelkader* **, *OUALD SAADI Houcin, BOUTALEB Abdelmadjid, NIAR Saadedine.*

Laboratoire des télécommunications optiques
INTTIC Route de Sénia BP 1518 Oran M'nouer 31000 Oran (ALGERIE).
Tel: 213 41 29 93 21 Fax: 213 41 29 93 08.
**achenika@ITO.dz* , ***a_temmar @hotmail.com*
Reçu le : 10/02/2010 *Accepté le : 27/09/2010*

Résumé :

Le domaine des communications par fibres optiques est actuellement caractérisé par une augmentation de la demande en terme de capacité de transmission. On cherche à transmettre de plus en plus de données et de nouvelles applications voient le jour. Il persiste toutefois certaines limitations, comme les effets dispersifs. Parmi ces effets, la dispersion modale de polarisation (PMD) est un élargissement temporel des signaux lié à la dépendance de la vitesse de groupe à la polarisation. Dans cet article on présente l'effet dégradent de la PMD sur la qualité d'un système optique (produit Bande-passante×Longueur), en basant sur la mesure de facteur Q et le taux d'erreur bit du système (TEB).

Mots clés : ***PMD/Fibre optique/Qualité de transmission/Biréfringence/Haut débit/Délai groupe différentiel/Taux d'erreur.***

1. Introduction :

La dispersion modale de polarisation (PMD) est un obstacle énorme devant l'augmentation des débits sur une partie des réseaux de la plupart des compagnies de télécommunication. La PMD est une quantité variable dans le temps qui dégrade la largeur de bande passante de système et c'est difficile de minimiser leur effet. Elle affecte la fiabilité de réseau et devienne plus en plus gênante lorsque les débits de réseau augmentent.

L'impact de PMD a été noté la première fois dans les transmissions analogiques dues à la nature sensible du signal. Mais puisque les réseaux émigrent à des vitesses plus élevées, l'effet devient plus important, au point où il affecte maintenant quelques transmissions de courte distance (métro). Plus les débits binaires continuent à augmenter, l'impact sur la fiabilité, extension et la largeur de bande passante des systèmes optiques à fibre monomode sera plus profond. En plus à cela, la PMD est un phénomène aléatoire et basé sur les statistiques et est souvent mesurée incorrectement.

2. Rappels théoriques sur la biréfringence et la PMD:

De manière idéale, le mode fondamental qui se propage dans les fibres correspond en fait à deux modes dégénérés de polarisations orthogonales. En pratique, les petits défauts de géométrie et les petites anisotropies du matériau provoquent la levée de dégénérescence des deux modes: la constante de propagation n'est plus la même pour les deux polarisations et l'on parle alors de biréfringence modale. Le degré de biréfringence *B* de la fibre s'évalue à travers la différence entre les indices effectifs des deux axes par la relation [1].

$$B = \frac{|\beta_x - \beta_y|}{k_0} = |n_x - n_y| \qquad (1)$$

où β_x, β_y et n_x, n_y représentent respectivement les constantes de propagation et les indices effectifs correspondant à une onde polarisée selon les directions transverses z et y. L'axe pour lequel l'indice effectif est le plus faible est appelé axe rapide parce que la vitesse de groupe est la plus

grande pour une onde lumineuse se propageant dans cette direction. Pour la même raison, l'axe avec l'indice effectif le plus grand est appelé axe lent.

La biréfringence est une différence d'indice de réfraction, et donc une différence de constantes de propagation β, entre deux polarisations orthogonales.

Quand on injecte une impulsion lumineuse dans une fibre biréfringente, on excite les deux modes à la fois. Chacun se propage le long de la fibre avec des temps de groupe différents, ce qui provoque l'élargissement de l'impulsion à la sortie de la fibre.

La biréfringence -différence de vitesse de phase- s'accompagne en général d'une différence de vitesse de groupe, qui est appelée dispersion modale de polarisation (PMD en anglais).

Contrairement au phénomène de biréfringence, la PMD déforme les impulsions. La dispersion modale de polarisation a pour effet de séparer temporellement les impulsions selon deux polarisations orthogonales comme représenté sur la fig1. La différence de temps de groupe est appelée temps de groupe différentiel (ou DGD Differential Group Delay).

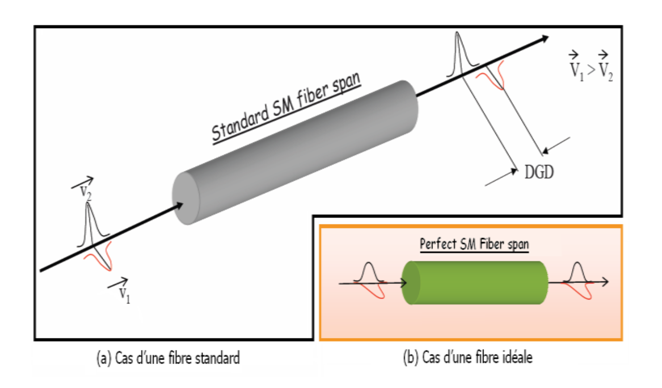


Fig 1 : *Séparation temporelle d'une impulsion en deux par la PMD.*

On parle alors de dispersion modale de polarisation puisque des polarisations différentes se propagent à des vitesses de groupe différentes.

Pendant que cette polarisation se propage le long de la fibre, elle peut élargir l'impulsion qui peut entraîne le chevauchement avec d'autres impulsions, et par conséquence change sa propre forme jusqu'à ce qu'elle soit indétectable au récepteur.

Ce phénomène, lié à la dispersion modale de polarisation (PMD), a été étudié intensivement pendant les années 1990 à cause de son caractère limitatif pour les systèmes de transmissions longue distance à hauts débits [2].

Pour une valeur B donnée, on définit également une longueur de fibre caractéristique, appelée longueur de battement L_B, qui correspond à la période à laquelle l'énergie est échangée entre les deux modes fondamentaux au cours de la propagation [1].

$$L_B = \frac{2\pi}{|\beta_x - \beta_y|} = \frac{\lambda}{B} \text{ (m)} \qquad (2)$$

Toutes les fibres fabriquées et installées sont naturellement biréfringentes. Typiquement les valeurs de biréfringence dans les fibres de transmission de type SMF sont de l'ordre de $B=10^{-7}$ soit une longueur de battement $L_B= 15.5$ m à 1550 nm [3].

Pour pouvoir préserver l'état de polarisation de l'onde au cours de sa propagation, il faut recourir à des fibres dites à maintien de polarisation. Dans ces fibres, des contraintes sont provoquées en utilisant des dopants ou des modifications mécaniques dans leurs cœurs lors de la fabrication. Le degré de biréfringence B résultant est relativement important et assez bien défini.

L'utilisation des fibres à maintien de polarisation nécessite une identification préalable des axes lent et rapide, avant qu'un signal lumineux ne soit injecté dans la fibre. Quand la direction de polarisation du signal linéairement polarisé coïncide avec les axes lent ou rapide, l'état de polarisation est préservé au cours de la propagation. Au contraire, si la direction de polarisation est décalée par rapport à ces axes, la polarisation évolue avec une période égale à la longueur de battement L_B. Cependant, le coût élevé des fibres à maintien de polarisation empêche leur utilisation systématique dans les systèmes de transmission.

En plus de la géométrie de fibre (interne), la PMD également est créée par les forces externes telles que des courbures, des torsions et pressions. Les causes externes peuvent être dépendant du temps, particulièrement quand la fibre est déployée dans le réseau. Ici, la fibre est soumise à des conditions variables dans le temps, changements de température, emplacement de câble due aux vibrations mécaniques (comme des camions ou des trains passant tout près), rendant la compensation de PMD difficile.

Une caractéristique essentielle de ce phénomène réside dans son caractère aléatoire, étant donné qu'il est principalement d'origine extrinsèque et dépend de la qualité de la pose de celle-ci. La fibre optique apparaît ainsi comme un milieu fluctuant. La valeur moyenne du retard n'est donc pas suffisante pour le décrire totalement et nous utiliserons donc des données statistiques. La mesure principale est le DGD (Differential Group Delay).

$$DGD = B_l \times \sqrt{L_B} \times \sqrt{L} \quad (3)$$

où B_l est la biréfringence linéique, L_B, L sont respectivement la longueur de battement et la longueur de liaison [4].

La montée en débit dans les systèmes de transmission par fibres optiques a fait apparaître des phénomènes qui étaient jusque là négligeables. C'est le cas de la dispersion modale de polarisation, notamment sur certaines fibres des anciennes générations déjà installées : le phénomène n'était pas pris en compte jusque dans les années 90. Aussi de nombreuses fibres installées présentent des valeurs de PMD importantes.

De nombreux exemples de mesure sont donnés dans la littérature. En général, les résultats montrent une tolérance de l'ordre de 10% du temps bit pour le format NRZ et de 15% du temps bit pour les formats RZ. Si l'on considère que ce phénomène devient gênant à partir de 10% du temps bit, une PMD de 10 ps (resp. 2,5 ps) est la limite tolérable pour un débit de 10 Gbit/s (resp. 40 Gbit/s) [5].

3. Simulations:

L'ensemble de simulations présentées ci-dessous sont faites pour étudier l'influence de la PMD sur la qualité de signal de réception. Ceci en utilisant le simulateur COMSIS.

Avant de passer aux simulations il faut d'abord présenter comment utiliser ce simulateur pour étudier la PMD.

3.1. Prise en compte de la PMD en utilisant COMSIS :

Pour prendre en compte le phénomène de PMD dans la liaison simulée avec COMSIS, il est nécessaire de décomposer le signal en deux parties représentant ses polarisations. Ceci est réalisable en utilisant le bloc Vectorisation-Champ du logiciel qui permet d'obtenir le champ optique sous forme vectorielle et aussi de prendre en compte sa polarisation. Ce modèle (Fig 2) possède une entrée et deux sorties. La modélisation de la fibre se fait alors en utilisant le même bloc Fibre Optique Monomode du logiciel, mais qui est sélectionné avec deux entrées et deux sorties (Fig 2) [6].

Les paramètres à considérer dans COMSIS pour simuler la PMD sont la biréfringence linéique et la longueur de couplage. En effet, la description de la PMD réside dans les variations très aléatoires à la fois de la grandeur et de l'orientation de cette biréfringence. Aussi, pour reproduire des changements d'orientation de la biréfringence, COMSIS utilise pour ses calculs la présence de lames biréfringentes régulièrement espacées de la longueur de couplage, et orientées les unes par rapport aux autres selon des angles aléatoires.

La mesure principale est le DGD. Il correspond au retard différentiel entre les états principaux, est donné par la relation (3). La condition primordiale pour que le décalage entre les composantes Ex et Ey en sortie de la fibre soit égal à la valeur du DGD est que les axes de décomposition Ex et Ey et les états principaux soient confondus [7-8].

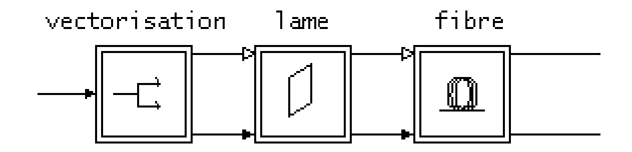


Fig 2 *: Prise en compte de la polarisation d'un signal et les doubles entrées et sorties des fibres.*

3.2. Impact de la PMD sur la qualité de transmission dans une liaison optique :

3.2.1. Présentation de la simulation :

Dans cette simulation une modulation externe a été choisie dans le but d'une compatibilité avec le débit choisi (2.5Gbps à 160Gbps), le module de vectorisation du champ est utilisé ici pour prendre en compte la polarisation du champ optique et le présenté sous forme vectoriel et la lame biréfringente est utilisée pour produire de la biréfringence.

L'étude a été réalisée sur l'influence de la PMD sur la qualité de transmission en fonction de la longueur de transmission et le débit de données (NRZ). Elle a été menée avec la liaison de référence (Fig 3). Les résultats présentés sont donc issus d'une liaison constituée d'une fibre standard

G.652 (SMF) de longueur varie entre 50 km et 10000 km. Les paramètres caractéristiques de la PMD de la fibre SMF sont une biréfringence linéique égale à 0,05 ps/km et une longueur de couplage égale à 1 km. Le décalage entre les composantes du champ est calculé en utilisant la relation (3).

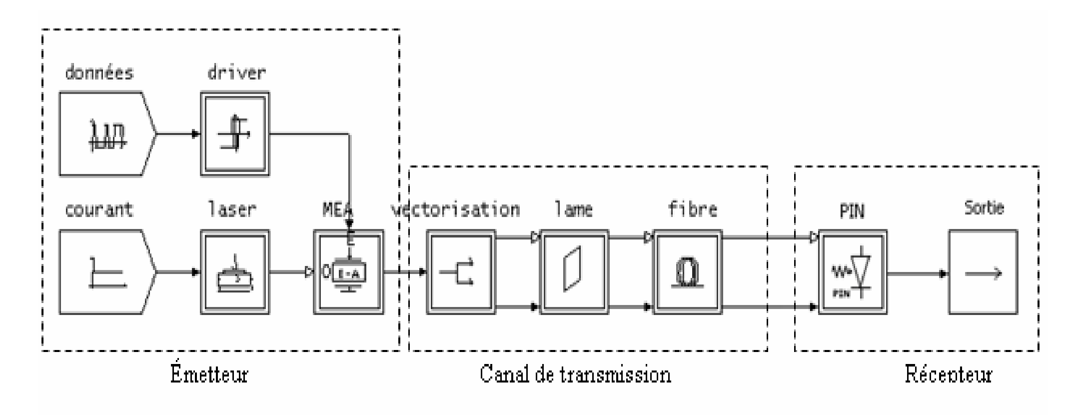


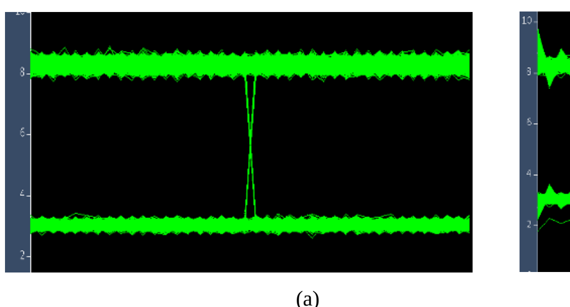
Fig 3 : *Schéma bloc de la liaison simulée.*

3.2.2. Résultats de la simulation :

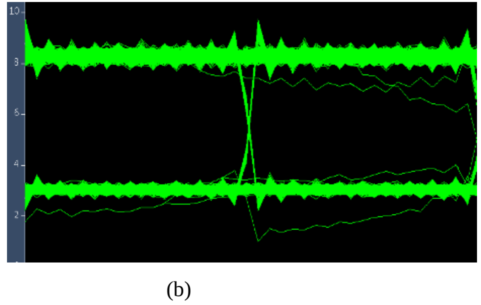
i) Pour la première partie de simulation, on a étudié l'effet de la PMD sur la qualité de transmission, les valeurs typiques pour la liaison simulée sont :

- Longueur de la fibre =100 km.
- Biréfringence linéique = 0,05ps/km.
- Longueur de couplage = 1km.

Le signal d'entrée est de type NRZ 50% avec un débit de 40Gbps. La liaison simulée est toujours celle représentée sur la Figure 3. Ces simulations sont réalisées avec les paramètres de PMD décrits ci-dessus et une valeur de DGD calculée par COMSIS pour les caractéristiques de biréfringence donnée. La Figure 4 représente les diagrammes de l'oeil obtenus en sortie de PIN, selon que la PMD soit prise en compte ou non.



(a)



(b)

***Fig 4**: Diagrammes de l'oeil en sortie (a) sans prise en compte de la PMD, (b) avec prise en compte de la PMD.*

La première information tirée de ces figures, on voie bien que le signal de diagramme de l'œil (a) présente une bonne qualité par rapport au signal (b). Les facteurs de qualité et les TEB ont été calculés dans les deux cas (Q_1=14.1/TEB_1≈10^{-34}, Q_2=11.2/ TEB_2 ≈10^{-29}), et la PMD a fait diminuer sa valeur de 20% pour 100 km de transmission. Son influence n'est donc pas extrêmement importante car le TEB reste toujours supérieur à sa valeur critique [10^{-10}-10^{-9}], mais pour des longueurs de fibres plus importantes, et par conséquent des valeurs du DGD plus grandes voire plus proches du temps bit des données, son rôle sera conséquent sur la qualité de transmission, ceci c'est l'objet de la 2eme simulation.

ii) Pour la 2eme partie de simulation, on a étudié l'influence de la PMD sur la qualité de transmission, mais cette fois pour des débits et des longueurs de liaisons différents, les valeurs typiques des simulations sont :

- Longueur de la fibre varie entre 50 km à 10000 km.
- Le débit de signal NRZ prend les valeurs {2.5, 10, 40, 80, 160} Gbps.
- Biréfringence linéique = 0,05ps/km.
- Longueur de couplage = 1km.

La liaison simulée est toujours celle représentée sur la Figure 3. Ces simulations sont réalisées avec les paramètres de PMD décrits ci-dessus.

Les résultats de cette étude sont reportés sur les figures 5-7.

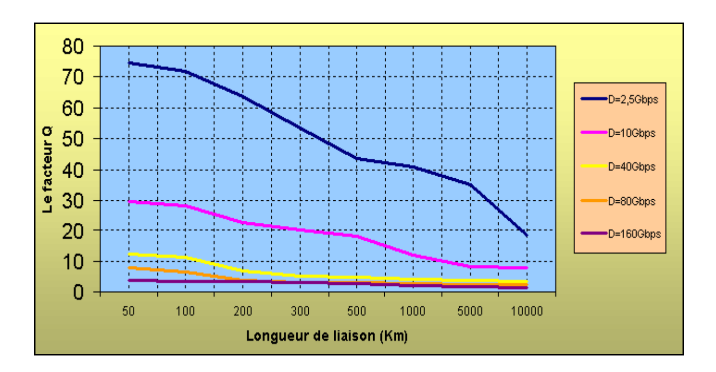


Fig 5: *Influence de la PMD sur le facteur Q en fonction de la longueur de la liaison pour des débits différents.*

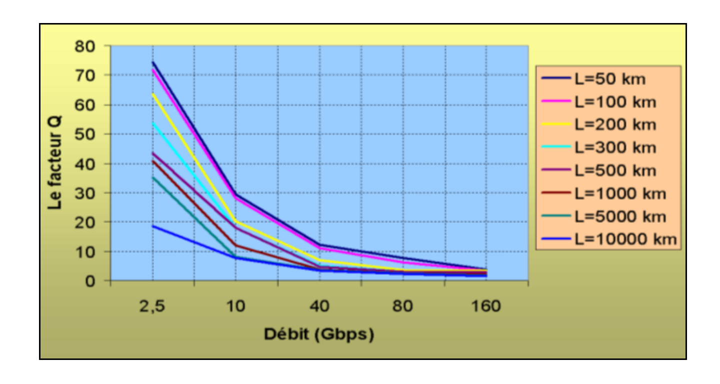


Fig 6: *Influence de la PMD sur le facteur Q en fonction de débit pour des longueurs différentes.*

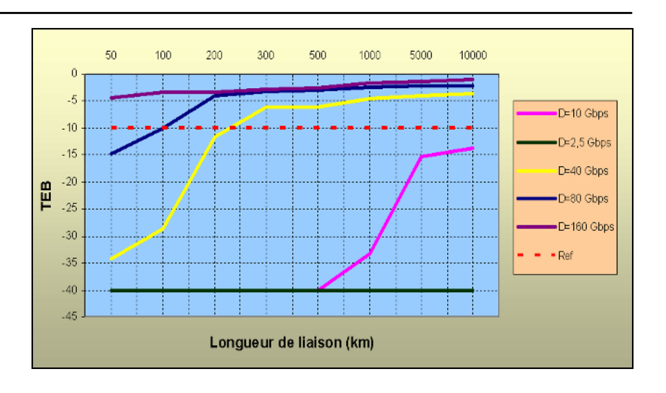


Fig 7: *Influence de la PMD sur le TEB en fonction la longueur de la liaison et de débit.*

La figure 5 présente l’influence de la PMD sur le facteur Q en fonction de la longueur de la liaison pour des débits différents, on remarque bien que plus la longueur de la liaison augmente la qualité de transmission diminué, ceci est du par l’augmentation de DGD subit. Ainsi, pour la figure 6 qui montre bien l’influence de la PMD sur le facteur Q en fonction de débit pour des longueurs différentes, on voit que la qualité de signal diminue très rapidement lorsque le débit augmente, ceci résulte de la diminution de temps entre impulsions, ce qui rendre les interférences inter-symboles plus probable.

La figure 7 présente l’influence de la PMD sur le TEB en fonction la longueur de la liaison pour des débits différents, les résultats montrent que pour les débits {2.5, 10} Gbps les liaisons peuvent atteindre 10000 km est la qualité de transmission reste bonne, parce que le TEB subit est toujours inférieur à sa valeur critique [10^{-10}-10^{-9}]. Or pour des débits supérieurs à 40Gbps les longueurs de liaisons ne peuvent pas dépasser les 250 km pour que le système présente une bonne qualité.

4. Conclusion :

La Dispersion Modale de Polarisation présente un handicape important dans les systèmes de transmissions par fibre optique, et vue son caractère aléatoire, il n’existe pas de modèle de prédiction simple pour l’interpréter, donc reste le facteur majeur limitant le débit de transmission sur fibres monomodes, alors que la dispersion chromatique est parfaitement gérée par les techniques de compensation (exemple : DCF). La PMD est un paramètre non négligeable dans les transmissions par fibre optique à 40 Gbps pour des longueurs au-delà de 250 km et doit être impérativement intégrée dans les simulations des liaisons.

5. Bibliographie:

[1] I. Kaminow, "Polarization in optical fibers", *IEEE J. Quantum Electron*, QE-17, pp. 15–22(1981).

[2] E. Lichtman, "Performance limitations imposed on all-optical ultralong lightwave systems at the zero-dispersion wavelength", *J.Lightwave Technol.*, 13, pp. 898–905 (1995).

[3] H. Kogelink, R. M. Jopson, L. E. Nelson, "Polarization-mode dispersion" in Optical Fiber Telecommunications IVB « Systems and impairments », *I. Kaminow and T. Li, Academic Press*, 2002, pp. 725-861.

[4] FOSCHINI G.F. end POOLE C.D., "Statistical Theory of Polarization Dispersion in Single Mode Fibers", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, November 1991, Vol. 9, n°11, pp. 1439-1456.

[5] B. Clouet "Étude de la dispersion modale de polarisation dans les systèmes régénérés optiquement" ; Thèse doctorat UNIVERSITÉ DE RENNES I, décembre 2007, pp. 62-64.

[6] IPSIS, Manuel d'utilisation du logiciel COMSIS.

[7] POOLE C.D. and WAGNER R. E., "Phenomenological Approach to Polarization Dispersion in Long Single Mode Fibers", *Electronics Letters*, September 1986, Vol. 22, N° 19, pp. 1029-1030.

[8] POTTIER Eric and SAILLARD Joseph, "Fondements mathématiques de la polarimétrie et son application au domaine du radar", *Annals of Telecommunications*, 1992, Vol. 47, n°7-8, pp. 314-336.